

## Einfluss der Siedlungsform auf die Schallimmission an Fassaden – numerische Simulationen

Arthur Schady und Dietrich Heimann,

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Physik der Atmosphäre, Oberpfaffenhofen, Germany

**Zusammenfassung** Die Wohnbebauung ist vielfach einem hohen Schallpegel infolge des Verkehrs auf vorbeiführenden Straßen ausgesetzt. In welchem Maße der Schall in die Siedlungsgebiete eindringt, hängt unter anderem von der Art der Bebauung und der Siedlungsform ab. In diesem Artikel werden 15 unterschiedliche Gebäudeanordnungen untersucht und es wird exemplarisch gezeigt, wie ein dreidimensionales wellenbasiertes Schallausbreitungsmodell eingesetzt werden kann, um die Widerstandsfähigkeit dieser möglichen Siedlungsformen gegenüber dem Verkehrslärm zu bewerten. Im Vergleich zu standardisierten Lärmprognoseverfahren bilden wellenbasierte Modelle den Schalleintrag in den Bereich der Gebäude-Rückseiten realistischer ab, da sie dreidimensionale Beugungseffekt an Gebäudekanten und meteorologisch bedingte Brechungseffekte auf physikalischer Grundlage explizit berücksichtigen.

### Influence of urban morphology on the noise exposure of facades – numerical simulations

**Summary** Residential developments are often exposed to a high sound level due to traffic on passing roads. The extent to which sound penetrates into settlement areas depends, among other things, on the development type and the arrangement of buildings. In this article we study 15 different building arrangements and we show how a three-dimensional wave-based sound propagation model can be used to evaluate the resilience of these possible forms of settlement to traffic noise. Compared to standardized noise prediction methods, wave-based models calculate the sound input into the building backside areas more realistically, as they explicitly consider the three-dimensional diffraction effect at building edges and meteorologically induced refraction on a physical basis.

Der Zusammenhang zwischen der Lärmbelastung eines Wohngebiets durch Straßenverkehrslärm und der Bebauungsstruktur, d.h. der Geometrie der Gebäude und der Anordnung der Gebäude zueinander, wird im Wesentlichen durch zwei physikalische Prozesse hergestellt: (1) die Reflexion des Schalls, vor allem an den straßenzugewandten Fassaden, und (2) die Beugung von Schallwellen an vertikalen, horizontalen und ggf. schrägen Kanten der Gebäude und ihrer Dächer. Beide Prozesse bestimmen das Maß der Abschirmung der straßenabgewandten Fassaden und ggf. der Fassaden von Gebäuden in zweiter oder dritter Reihe. Je höher diese Abschirmung ist, umso besser fungiert die Gebäudeanordnung als Schallschutz und schafft ‚*quite areas*‘, also ruhige Bereiche, die vom Verkehrslärm nur wenig betroffen sind. Der Zusammenhang wurde schon vielfach in der Literatur dargestellt. So haben [1] und [2] städtebaulich Strukturparameter mit Schallpegeln oder Perzentilen des Schallpegels an Fassaden in Verbindung gebracht. Weitere Arbeiten in diesem Zusammenhang sind [3; 4; 5; 6]. **Bild 1** zeigt zwei reale Beispiele aus München und Frankfurt mit unterschiedlichen straßennahen Bebauungsformen, die zu entsprechend verschiedenen Schalleinträgen im Siedlungsbereich führen.

Ein weiterer Prozess, der eine Rolle spielen kann, ist die Schallwellenbrechung vor allem aufgrund von Wind. Diese kann den beugungsbedingten Schalleintrag in abgeschattete Bereiche je nach Windrichtung und -geschwindigkeit verstärken oder abschwächen [7; 8]. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Strömung innerhalb eines bebauten Gebiets durch die Gebäude selbst gestört ist und sich gerade an

den Beugungskanten starke Windgradienten bilden, wobei nicht nur vertikale Gradienten (über den Dächern), sondern auch horizontale Gradienten (an den Gebäudeseiten) die Schallbrechung bewirken. In jedem Fall sind alle Prozesse (Reflexion, Beugung, Brechung) im Bereich der Bebauung dreidimensional.

Standardisierte Lärmprognoseverfahren (z.B. ISO 9613 [9]) berücksichtigen das Zusammenwirken von dreidimensionalen Reflexionen, Beugungen und Brechung nur unzureichend. Meist wird angenommen, dass zwischen einer Quelle vor einem Gebäude und einem Empfänger dahinter nur ein einziger signifikanter Ausbreitungsweg existiert, in der Regel der Weg *über* das Gebäude. Meteorologische Einflüsse werden dabei zumeist nur pauschalisiert berücksichtigt und Einflüsse der Gebäude auf das Windfeld überhaupt nicht. Von daher kann es zur Lärmoptimierung bei der städtebaulichen Planung im Sinne der Schaffung lärmrobuster Wohngebiete, siehe z.B. [10; 11], geboten zu sein, anstelle standardisierter Verfahren aufwändigere Simulationsmodelle zu verwenden, um verschiedene Planungsvarianten in Hinblick auf die jeweilige Schallimmission an den Fassaden miteinander zu vergleichen und eine Rangfolge der Belastung zu ermitteln.

Im Folgenden wird demonstriert, dass es mit Hilfe eines wellenbasierten Schallausbreitungsmodells möglich ist bei vertretbarem Rechenaufwand ein Ranking der Lärmbelastung für verschiedene Siedlungsstrukturen zu erstellen, bei denen Reflexionen, Beugungen und Brechungen unter Berücksichtigung unterschiedlicher, realistischer Windfelder dreidimensional berücksichtigt werden.

## Numerische Simulationen

Bei dem hier verwendeten Typ wellenbasierter Schallausbreitungsmodelle handelt es sich um das so genannte „linearisierte Eulermodell“ oder auch *finite-difference time-domain* bzw. FDTD-Modell. Modelle dieser Art lösen die gegenüber einem beliebigen meteorologischen Hintergrund (Wind- und Temperaturverteilung) linearisierten Euler- und Kontinuitätsgleichungen zur zeitabhängigen Bestimmung der Schallschnelle und des Schalldrucks mit Hilfe numerischer Zeitintegration auf einem dreidimensionalen Gitter [12]. Im vorliegenden Fall wird an der Quelle zu Beginn der Simulation eine Schalldruckauslenkung (Puls) vorgegeben, die sich im Verlauf der Zeitintegration als solitäre Schallwelle ausbreitet. Die Simulation endet, wenn die Schalldruckwelle das Rechengebiet verlassen hat. An vorgegebenen Empfängerpunkten (virtuelle Mikrofone) wird der Schalldruckverlauf registriert und bezüglich der Schallintensität und ggf. des Spektrums ausgewertet.

Im Folgenden wird von einer 24 m breiten Hauptstraße ausgegangen. Diese wird von einer 12 m breiten Nebenstraße gekreuzt. Auf diese Weise entstehen vier Straßenblöcke, auf denen längliche Gebäude entweder parallel, senkrecht oder im 45°-Winkel schräg zur Richtung der Hauptstraße ausgerichtet sind. **Bild 2** zeigt eine solche Anordnung. Der Verkehr (Schallemission) wird auf die westliche Fahrbahn der Hauptstraße beschränkt. Um die Simulationen ökonomisch durchführen zu können, werden die Gebäude in den vier Straßenblöcken jeweils spiegelsymmetrisch bezüglich der beiden Straßenachsen angeordnet. Auf diese Weise repräsentieren die Ergebnisse in den westlichen Straßenblöcken die Immission aufgrund der gebäudenahen Fahrbahn und die Ergebnisse in den östlichen Straßenblöcken die Immission aufgrund der gebäudefernen Fahrbahn.

Die Häuser sind 12 m breit und 18, 36 oder 54 m lang. Alle Gebäude sind 12 m hoch (E+3 Etagen) und haben ein Flachdach. An den Längsfassaden der Gebäude wird von einem Fensterraster von  $6 \times 3$  m ausgegangen und die virtuellen Mikrofone werden 2 m vor den Mittelpunkten der Rastermaschen, d.h. 2 m vor den „Fenstern“, positioniert. Vor den Kopffassaden werden keine Mikrofone platziert. In **Bild 3** ist die Mikrofonanordnung beispielhaft für den kurzen Gebäudetyp dargestellt.

Insgesamt werden 15 Gebäudeanordnungen untersucht, die in **Bild 4** jeweils für den südwestlichen Straßenblock dargestellt sind. Um eine bessere Vergleichbarkeit zu erreichen ist das umbaute Volumen für alle 15 Anordnungen gleich und beträgt je Straßenblock  $15.552 \text{ m}^3$ . Auch die Anzahl der virtuellen Mikrofone ist für alle Gebäudeanordnungen gleich und beträgt 144 je Straßenblock.

Zur Einordnung der Ergebnisse aus der Simulation mit dem wellenbasierten Modell wird zusätzlich gezeigt, welche Ergebnisse standardisierte Lärmprognoseverfahren (z.B. ISO 9613-2) für dieselben Konfigurationen liefern. Meteorologische Einflüsse werden bei diesem Vergleich nicht betrachtet. Ziel der Vergleichsrechnung ist es festzustellen, welchen Einfluss die Berechnungsmethode auf die Schallabschirmung der Gebäudeanordnungen hat. Für die Berechnung wurde eine identische Konfiguration der Gebäude und Empfänger entlang der Fassaden aufgebaut. **Bild 5** zeigt beispielhaft die gesamte Anordnung Nr. 13 aus der Vogelperspektive. Um die zyklischen Ränder aus dem Eulermodell zu beachten, wurden hier dieselben Blöcke nördlich und südlich an das Untersuchungsgebiet wiederholt implementiert. Gerechnet wurde nach ISO 9613-2, mit absorbierendem Boden ( $G=1$ ) und zwei Reflexionen unter Benutzung der Software CadnaA® [14].

Die Ergebnisse aller 240 simulierten Kombinationen (15 Gebäudeanordnungen mit je 16 unterschiedlichen meteorologischen Bedingungen) relativ zum Ergebnis der entsprechenden Referenzsimulation (ohne Gebäude) werden an den  $4 \times 144$  virtuellen Mikrofonen jeder Gebäudeanordnung ausgewertet. Um ein Ranking der verschiedenen Gebäudeanordnungen durchzuführen, ist die Definition einer geeigneten Metrik notwendig. In dieser Studie wird der arithmetische Mittelwert der Abweichungen (in dB) der berechneten Schallimmission an den virtuellen Mikrofonen vor den „Fenstern“ der Fassade von den entsprechenden Ergebnissen der Referenzsimulation verwendet. Dabei erfolgt die Mittelung für jede Gebäudeanordnung jeweils über alle Empfänger und alle meteorologischen Situationen. Die Art der Nutzung der Räume (Wohnen, Schlafen, Küche, Bad) hinter den Mikrofonpositionen bleibt unberücksichtigt, d.h. alle Mikrofonpositionen werden gleich gewichtet.

Um in dem wellenbasierten Modell eine möglichst hohe räumliche Auflösung bei vertretbarem Rechenaufwand zu erzielen, wurde eine numerische Maschenweite von 0,5 m gewählt. Man beachte, dass eine Halbierung der Maschenweite, d.h. eine Verdopplung der räumlichen Auflösung, bei dreidimensionalen Simulationen eine Erhöhung des Speicherplatzbedarfs um den Faktor 8 und eine Erhöhung der Rechenzeit um den Faktor 16 nach sich zieht. Bei der gewählten Maschenweite sind  $481 \times 337 \times 161$  (ca. 26 Millionen) Modellmaschen (Gitterpunkte) notwendig um die vier Straßenblöcke zu umfassen. Bei einem Zeitschritt von 1,4 ms und einer Simulationszeit von 0,45 s (entsprechend einem Schallausbreitungsweg von ca. 150 m) benötigt eine Simulation etwa 30 min auf einem Intel Xeon E5-2680 v3 Prozessor mit 12 Kernen und 2,5 GHz Taktfrequenz unter dem Betriebssystem Linux.

Nun ergibt sich eine Schwierigkeit. Die gewählte Maschenweite von 0,5 m ist zwar klein genug um die Gebäude aufzulösen, aber bezüglich der beim Verkehrslärm üblichen Wellenlängen (z.B. 0,34 m bei 1 kHz) relativ grob, zumal eine hinreichend genaue numerische Darstellung einer Wellenlänge mindestens fünf Maschen erfordert. Für eine 1-kHz-Welle mit einer Wellenlänge von 0,34 m wäre entsprechend eine Maschenweite von 6,8 cm notwendig. Eine Simulation würde dann statt 30 min bereits ca. 1.460 Stunden bzw. 60 Tage erfordern, von der notwendigen Speicheranforderung ganz abgesehen.

Es gibt aber einen Ausweg. **Bild 6** (links) zeigt, welcher Spektralbereich mit welcher Maschenweite erfasst wird, d.h. bei einer Maschenweite von 0,5 m sind es Frequenzen bis ca. 140 Hz. Da hochfrequenter Schall weniger stark gebeugt wird als niederfrequenter Schall ist mit einer Überschätzung des Schallpegels in abgeschatteten Bereichen zu rechnen, wenn höherfrequente Schallanteile unberücksichtigt bleiben. Dies wird in **Bild 6** (rechts) deutlich, welches die Abschirmung durch unterschiedlich

hohe Gebäude bei unterschiedlicher Maschenweite des Modells wiedergibt. Je kleiner die Maschenweite, bzw. je höher die berücksichtigten Frequenzen, umso höher fällt die berechnete Abschirmung aus.

Wichtig ist aber nun Folgendes: unabhängig von der gewählten räumlichen Auflösung und damit auch unabhängig von dem berücksichtigten Spektralbereich ergibt sich stets, dass die Abschirmung umso größer ist, je höher das Gebäude ist, d.h. die Rangfolge der Abschirmwirkung der unterschiedlich hohen Gebäude kann bereits mit einer niedrigen Auflösung, d.h. mit der Beschränkung auf den niederfrequenten Spektralbereich ermittelt werden. Diese Tatsache wird im Folgenden ausgenutzt, d.h. es ist nicht das Ziel absolute Schallpegel zu bestimmen, sondern ein *Ranking* der unterschiedlichen Gebäudeanordnungen bezüglich ihrer Robustheit gegenüber dem Lärm des Verkehrs auf der Hauptstraße.

Für jede der 15 Gebäudekonfigurationen werden 16 Simulationen durchgeführt: eine Simulation mit windstiller Atmosphäre und 15 Simulationen mit unterschiedlichen Anströmbedingungen, wobei fünf Anströmrichtungen (W, SW, S, SE, und E) und drei Anströmgeschwindigkeiten (2, 4 und 6 m/s in 10 m über Grund) kombiniert werden. Die Beschränkung der Anströmung auf den Südsektor ist möglich wegen der spiegelsymmetrischen Anordnung der Gebäude bezüglich der Achse der Nebenstraße. Zusätzlich wurden 15 Simulationen ohne Wind und ohne Gebäude, aber mit virtuellen Mikrofonen an den Positionen der 15 Gebäudeanordnungen, als Referenz durchgeführt, um den Gebäudeeinfluss isolieren zu können. Diese Referenzsimulationen berücksichtigen nur die geometrische Schallausbreitung und den Boden. Die Schallemission ist stets für alle Simulationen gleich.

Die gebäudebeeinflussten Windfelder wurden dreidimensional mit einem mikroskaligen Strömungsmodell berechnet, das auch in [8; 13] verwendet wurde. **Bild 7** zeigt das Ergebnis einer solchen Windfeldsimulation für die Gebäudekonfiguration 13 bei Anströmung aus Südwest mit einer Geschwindigkeit von 2 m/s in 10 m über Grund. Es wird deutlich, wie die Gebäude die über die Zeitskalen der Turbulenz gemittelte Strömung ablenken und es örtlich zu verminderter, aber auch zu erhöhter Windgeschwindigkeit kommt.

## **Ergebnisse der Simulationen aus wellenbasiertem Modell und Standardverfahren ISO 9613-2**

Als Beispiel für die Schallabschirmung der Gebäude in dem wellenbasierten Modell zeigt **Bild 8** das Simulationsergebnis für die Gebäudekonfiguration 13 bei Windstille. Infolge von Reflexionen an den Fassaden wird die Schallimmission im Bereich der Straße zwischen den längs zur Straße stehenden Häusern verstärkt, während sich hinter den straßennahen Gebäuden ausgedehnte abgeschirmte Bereiche mit reduziertem Schallpegel bilden. Es ist zu beachten, dass die quantitativen Angaben in Dezibel nur für den der gewählten Maschenweite entsprechenden Spektralbereich gelten.

Im Vergleich dazu ist in den Ergebnissen gemäß ISO 9613-2 in **Bild 9** eine ähnliche räumliche Struktur der Schallabschirmung zu erkennen. Die Bereiche der Reflexion in der Straßenschlucht sind allerdings etwas schwächer ausgeprägt. Es werden zusätzlich die Ergebnisse der restlichen 14 Gebäudeanordnungen (ohne meteorologische Randbedingungen) relativ zum Ergebnis der entsprechenden Referenzsimulation (ohne Gebäude) an den  $4 \times 144$  virtuellen Mikrofonen jeder Gebäudeanordnung ausgewertet.

**Bild 10a** zeigt die Häufigkeitsverteilung des relativen Schallpegels (Immissionspegel mit Gebäuden minus Referenzpegel ohne Gebäude) für alle Gebäudeanordnungen. Es zeigen sich große Unterschiede in Hinblick auf den Anteil der Immissionsorte mit unterschiedlicher Abschirmung oder Verstärkung des Schallpegels aufgrund der Bebauung und der Meteorologie. Zu beachten ist wiederum, dass sich

die Dezibelangaben auf die gewählte Maschenweite und den entsprechenden Frequenzbereich beziehen. Deswegen wird hier nur auf die Rangfolge der Gebäudeanordnungen bezüglich ihrer Lärmresilienz eingegangen, die in der Abbildung auf der rechten Seite angegeben ist.

Erwartungsgemäß wird der größte Abschirmungseffekt (Rang 1) bei einer Gebäudeanordnung parallel zur Straße (Nr. 5), und der geringste (Rang 15), bei einer Anordnung senkrecht zur Straße erzielt (Nr. 8). Allerdings betrifft die Abschirmung bei straßenparalleler Bebauung nur die straßenabgewandten und straßenfernen Fassaden, während die Fassaden direkt an der Straße durch Reflexionen einen erhöhten Schallpegel erfahren. Das beste Gesamtergebnis (Rang 1) wird erreicht, weil die Gesamtlänge der straßennahen Fassaden möglichst kurz ist. Bei senkrecht zur Straße angeordneten Gebäuden (Nr. 3, 8, 15) profitieren nur wenige Fassadenteile von einer Abschirmung, allerdings fällt auch die Pegelverstärkung durch Reflexion nur gering aus. Interessant ist der Vergleich der Anordnungen Nr. 12 (Rang 2), Nr. 11 (Rang 3) und Nr. 10 (Rang 6). Hier bewirkt ein größerer Gebäudeabstand einen größeren Abschirmungseffekt. Schräg zur Straße stehende Gebäude (Nr. 2, 12, 14) bringen nur einen mäßigen Vorteil in Hinblick auf die Abschirmung. Sie können aber von Vorteil sein, wenn die sich kreuzenden Straßen etwa den gleichen Verkehr ausweisen oder die höchsten Emissionen von der Kreuzung ausgehen.

Im Vergleich zu **Bild 10a**, zeigt **Bild 10b** eine ähnliche Häufigkeitsverteilung des relativen Schallpegels (Immissionspegel mit Gebäuden minus Referenzpegel ohne Gebäude) für alle Gebäudeanordnungen, aber für das Standardverfahren ISO 9613-2. Die Unterschiede in Hinblick auf den Anteil der Immissionsorte mit unterschiedlicher Abschirmung oder Verstärkung des Schallpegels aufgrund der Bebauung wird auch hier deutlich. Die Rangfolge der Gebäudeanordnungen bezüglich ihrer Lärmresilienz, die in der Abbildung auf der rechten Seite angegeben ist, unterscheidet sich aber in einigen Fällen (siehe **Tabelle 1**). Dort erkennt man, dass in 8 von 15 Fällen die Berechnungsmethode keinen entscheidenden Einfluss auf die Rangfolge der Lärmresilienz hat. Dies sind insbesondere die Anordnungen mit straßensenkrechter Bebauung, also die für die Bewohner ungünstigen Fälle. In den Fällen 1, 4 und 6 jedoch unterscheiden sich die Ergebnisse der Berechnungsmethoden erheblich. In den Fällen 1 und 4 ergeben sich nach ISO 9613-2 bessere Schallabschattungen als mit dem wellenbasierten Modell. Wohingegen Fall 12 nach ISO 9613-2 im Vergleich zur FDTD-Methode deutlich schlechter ausfällt. Die kürzeren Gebäude schneiden für die Schallabschirmung im wellenbasierten Modell deswegen schlechter ab, als unter ISO 9613-2, weil sich hier die Beugung stärker auswirkt. Die früher schon erwähnte Überschätzung der niederfrequenten Anteile spielt dabei eine Rolle. Bei gleicher Ausrichtung (z.B. straßenparallel) erzielen die kleineren Häuser also gemäß der Berechnung nach ISO 9613-2 auch schon eine ähnliche Abschirmwirkung wie die großen Häuser in der FDTD Methode, was wahrscheinlich weniger realistisch ist.

Ein weiteres Beispiel zeigt **Bild 11** den Einfluss des Windes, ebenfalls für die Gebäudeanordnung 13. Vergleicht man die Ergebnisse für Westwind mit denen für Ostwind, so ergibt sich wie erwartet eine Erhöhung der Schallimmission im Mitwindbereich und eine Erniedrigung im Gegenwindbereich. Der Einfluss des Windes ist aber in den abgeschatteten Bereichen deutlich geringer, als dort, wo Baulücken einen höheren Schalleintrag zulassen.

**Bild 12** gibt die Verteilung der meteorologisch bedingten Variabilität des relativen Schallpegels wieder. Auffällig ist, dass die Gebäudeanordnung mit dem größten Abschirmungseffekt (Nr. 5) gleichzeitig diejenige mit der höchsten meteorologisch bedingten Variabilität ist (Rang 15). Das heißt, dass zu mindestens einige Fassadenteile der Gebäude nur bei bestimmten Anströmsituationen von hoher Abschirmung profitieren. Umgekehrt ist die Anordnung mit der geringsten Abschirmungswirkung (Nr. 8) diejenige mit der geringsten meteorologisch bedingten Variabilität (Rang 1), sodass es keine meteorologischen Situationen gibt, die wenigstens zeitweise zu einer erhöhten Abschirmung führen. Insgesamt

ist die Variabilität der Abschirmung aufgrund des Windes vor allem dann gering, wenn die Gebäude möglichst nahe an der Straße stehen, da hier der Effekt der Schallwellenbrechung noch relativ gering ist.

## Schlussfolgerungen

Die Anordnung von Gebäuden in einem Straßenblock hat einen erheblichen Einfluss auf die Beaufschlagung von Fassaden mit dem Schall einer durch das Bebauungsgebiet führenden Straße. Insbesondere werden straßenabgewandte und straßenferne Fassaden je nach der Stellung der Gebäude zueinander und gegenüber der Straße sehr unterschiedlich vom Verkehrslärm abgeschirmt. Maßgebliche physikalische Prozesse sind dabei neben der Reflexion des Schalls an den Fassaden vor allem die Beugung an Gebäudekanten und, im Falle einer Durchlüftung der Siedlung, auch die Brechung. Aufgrund der Geometrie sind diese Prozesse dreidimensional.

Es besteht also im Prinzip bereits bei der Bebauungsplanung ein Potenzial zur Lärminderung, d.h. es besteht die Möglichkeit Siedlungen möglichst „lärmresistent“ zu planen und ruhige Zonen (*„quite areas“*) zu schaffen. Dies setzt voraus, dass die relevanten Effekte bei der Lärmprognose Berücksichtigung finden. Herkömmliche Lärmprognoseverfahren, z.B. ISO 9613-2, RLS-90, eignen sich vor allem für die Berechnung der Schallimmission an den straßenzugewandten Fassaden. Dort, wo Beugung und Brechung eine besondere Rolle spielen, also an den straßenabgewandten und abgeschirmten Fassaden, sind sie indes nur bedingt geeignet, da Beugung und Brechung nur pauschal und oft nur zweidimensional berücksichtigt werden.

Wellenbasierte numerische Schallausbreitungsmodelle können zur Beurteilung der Abschirmungswirkung in Siedlungen beitragen. Diese Modelle berücksichtigen Reflexion, Beugung und Brechung sowie die Gebäudegeometrie dreidimensional. Beschränken sich die Simulationen aus Gründen der Rechenzeitökonomie auf niedrige Frequenzen, so lassen sich zwar keine absoluten A-bewerteten Schallpegel berechnen, aber unterschiedliche Baukonfigurationen lassen sich dennoch untereinander vergleichen und es ist möglich eine Rangfolge bezüglich der Schallimmission aufzustellen.

Während in diesem Artikel generische Gebäudeanordnungen ohne Raumnutzungsunterschiede betrachtet wurden, so lassen sich den Simulationen natürlich auch reale Planungen und unterschiedliche Raumnutzungen zugrunde legen. Bei einer räumlichen Auflösung von  $< 1$  m können auch komplexe Gebäudeformen (Schrägdächer, Dachüberstände, Balkone) berücksichtigen. Auch die Rauigkeit und der Reflexionsgrad der Fassaden können unterschieden werden. Die für das Ranking verwendeten Metriken können den jeweiligen Fragestellungen angepasst definiert werden.

Unter der Zuhilfenahme von Fernerkundungsmethoden ermöglichen die Ergebnisse dieser Studie eine Abschätzung der Lärmbelastung von Gebieten, für die keine explizite Lärmkartierung vorgenommen wurde, indem ähnliche Siedlungsstrukturen und die damit verbundene Lärminderung den hier präsentierten exemplarischen Formen zugeordnet werden.

Dr. Arthur Schady und Dr. Dietrich Heimann

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Physik der Atmosphäre, Oberpfaffenhofen, Germany

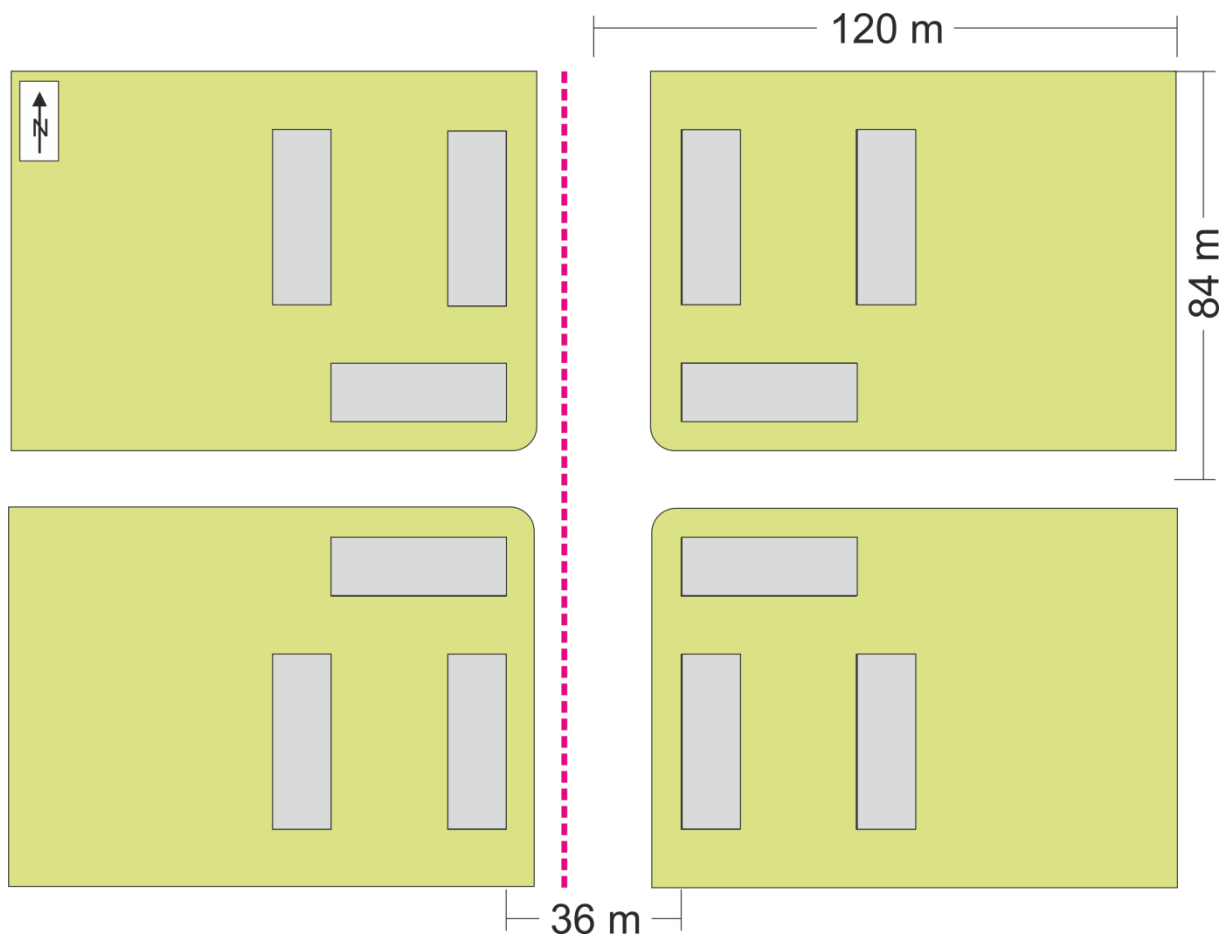
## Literatur:

- [1] *Hao Y., Kang J., Krijnders D., Wörtche H.*: On the relation between traffic noise resistance and urban morphology in low-density residential areas. *Acta Acustica united with Acustica* 101 (2015), 510-519.
- [2] *Silva L.T., Oliveira M., Silva J.F.*: Urban form indicators as proxy on the noise exposure of buildings. *Appl. Acoustics* 76 (2014), 366-376.
- [3] *Oliveira M.F., Silva L.T.*: The influence of urban form on facades noise levels. *Transactions on Environment and Development* 7 (2011) 125-135.
- [4] *Zhou Z., Kang J., Zou Z., Wang H.*: Analysis of traffic noise distribution and influence factors in Chinese urban residential blocks. *Environment and Planning B: Planning and Design* 44 (2017), 570-587.
- [5] *Bouzir T.A.K., Zemmouri N.*: Effect of urban morphology on road noise distribution. *Energy Procedia* 119 (2017), 376-385.
- [6] *Ariza-Villaverde A.B., Jiménez-Hornero F.J., De Ravé E. G.*: Influence of urban morphology on total noise pollution: multifractal description. *Sc. Tot. Environ.* 472 (2014), 1-8.
- [7] *Van Renterghem T., Botteldooren D.*: Meteorological influence on sound propagation between adjacent city canyons: A real-life experiment. *J. Acoust. Soc. Am.* 127 (2010), 3335-3346.
- [8] *Heimann D.*: Three-dimensional linearised Euler model simulations of sound propagation in idealised urban situations with wind effects. *Appl. Acoustics* 68 (2007), 217–237
- [9] DIN ISO 9613-2 "Akustik - Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien; Teil 2: Allgemeines Berechnungsverfahren" Ausgabe Oktober 1999
- [10] *Kaiser J.*: Lärmrobuste Stadtquartiere. *Lärmbekämpfung* 5 (2010), 74-77.
- [11] *Umweltbundesamt*: Umwelt- und Aufenthaltsqualität in kompakt-urbanen und nutzungsgemischten Stadtstrukturen - Analysen, Fallbeispiele, Handlungsansätze unter Nutzung und Weiterentwicklung des Bauplanungs- und Umweltrechts. Texte 06/2018.
- [12] *Van Renterghem T.*: Efficient outdoor sound propagation modeling with the finite-difference time-domain (FDTD) method: a review. *Aeroacoustics*, 13 (2014), 385 – 404.
- [13] *Heimann D., Blumrich R.*: Anwendungsbeispiele numerischer Schallausbreitungssimulationen mit konsistenter Berücksichtigung der Atmosphäre und des Bodens. *Zeitschrift für Lärmbekämpfung* 49 (2002), 91-97.
- [14] URL: <https://www.datakustik.com/produkte/cadnaa/> (09.Oktober 2018)

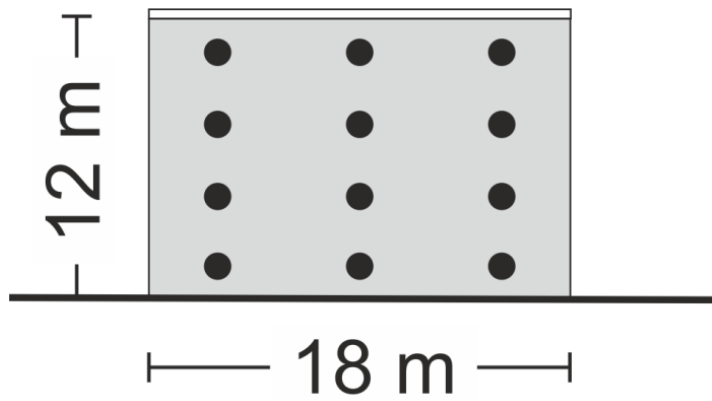


**Bild 1** Zwei Beispiele straßennaher Gebäudeanordnungen. Links: Bsp. München, Fürstenrieder Str., straßenparallele Bebauung, rechts: Bsp.: Frankfurt, Gießener Str., straßennormale Bebauung. Kartengrundlage: opentopomap.org (CC-BY-SA 3.0).

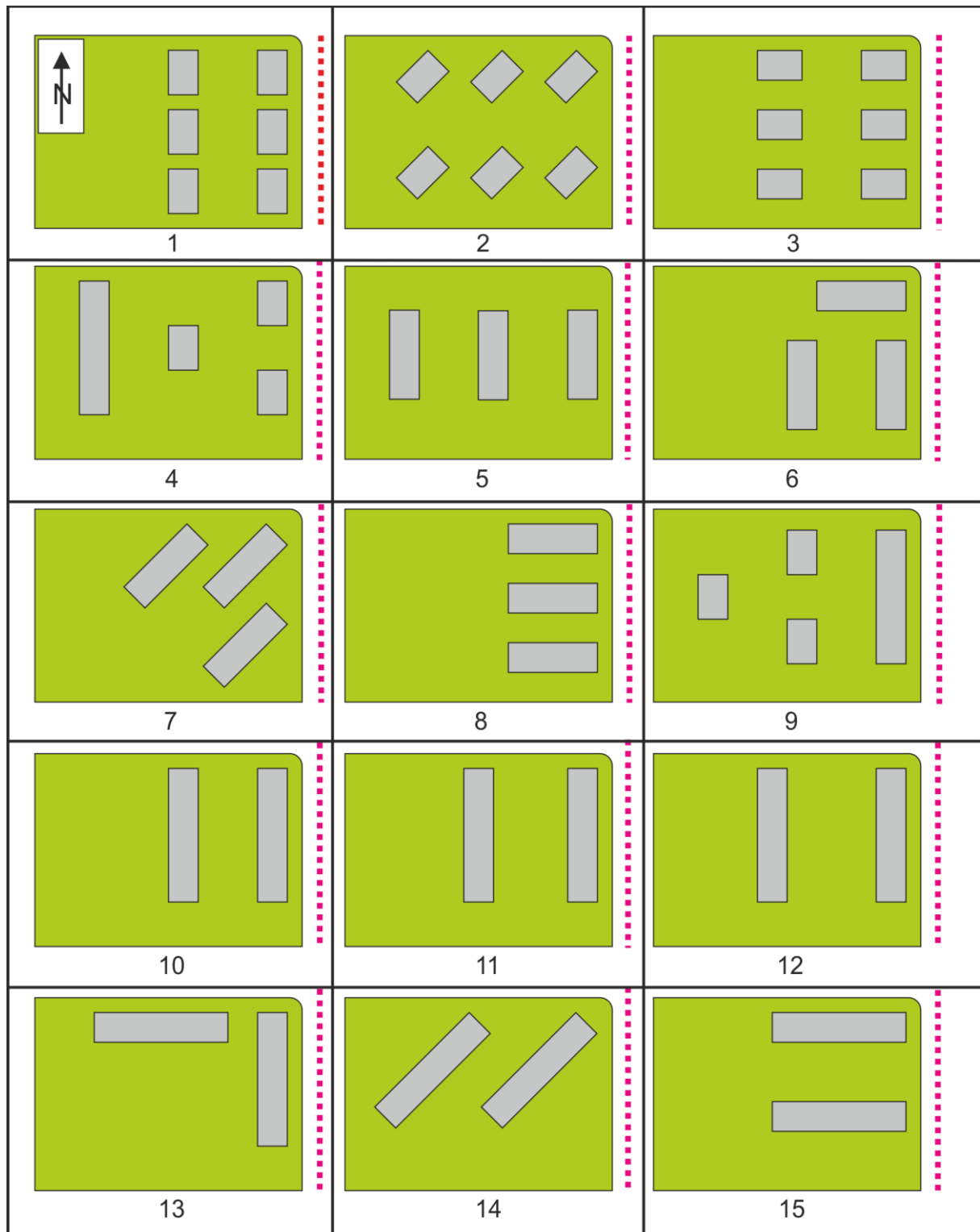




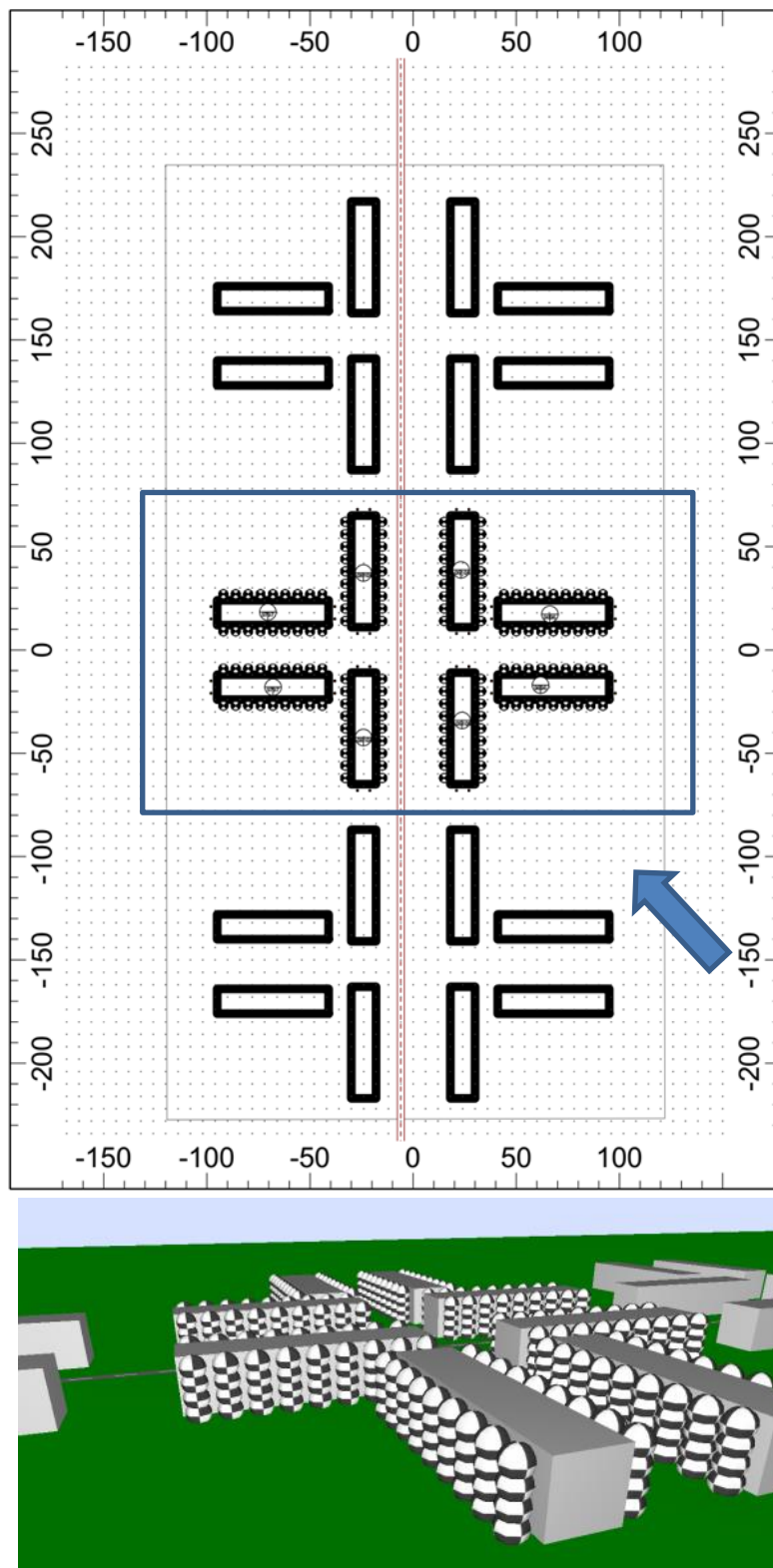
**Bild 2:** Beispiel einer der betrachteten Gebäudeanordnungen (Nr.6, siehe Abbildung 4a). Die Gebäude innerhalb der vier Straßenblöcke (grüne Felder) sind jeweils spiegelbildlich angeordnet. Die rote Linie markiert die Lage der Linienquelle einer Fahrbahn.



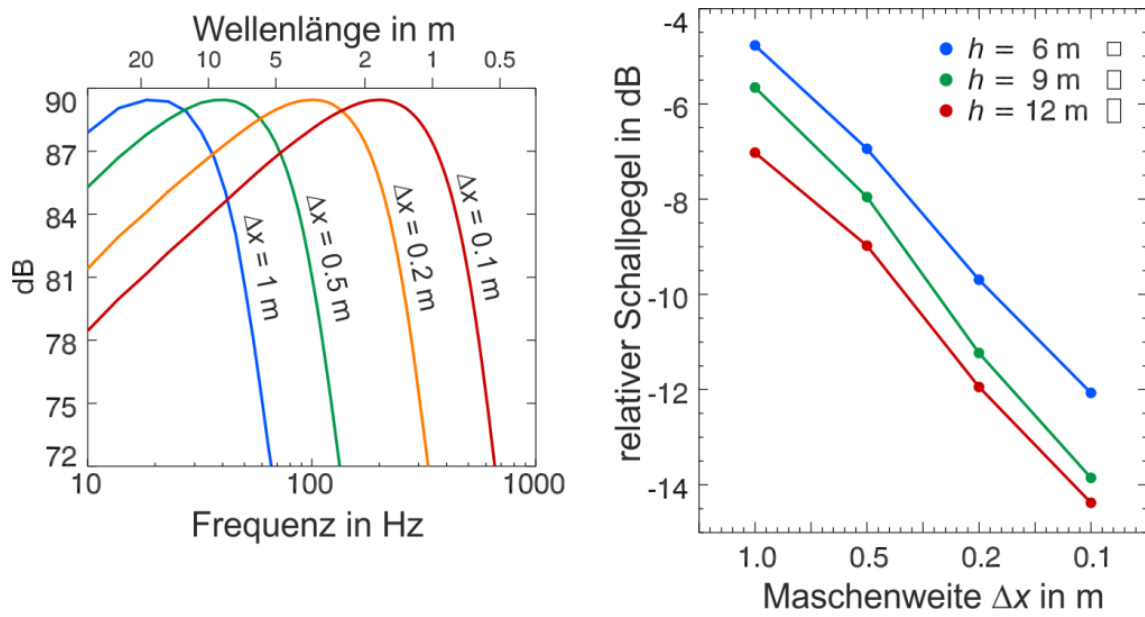
**Bild 3:** Längsfassade eines 18 m langen Flachdach-Gebäudes mit den Positionen der virtuellen Schallempfänger 2 m vor den „Fenstern“.



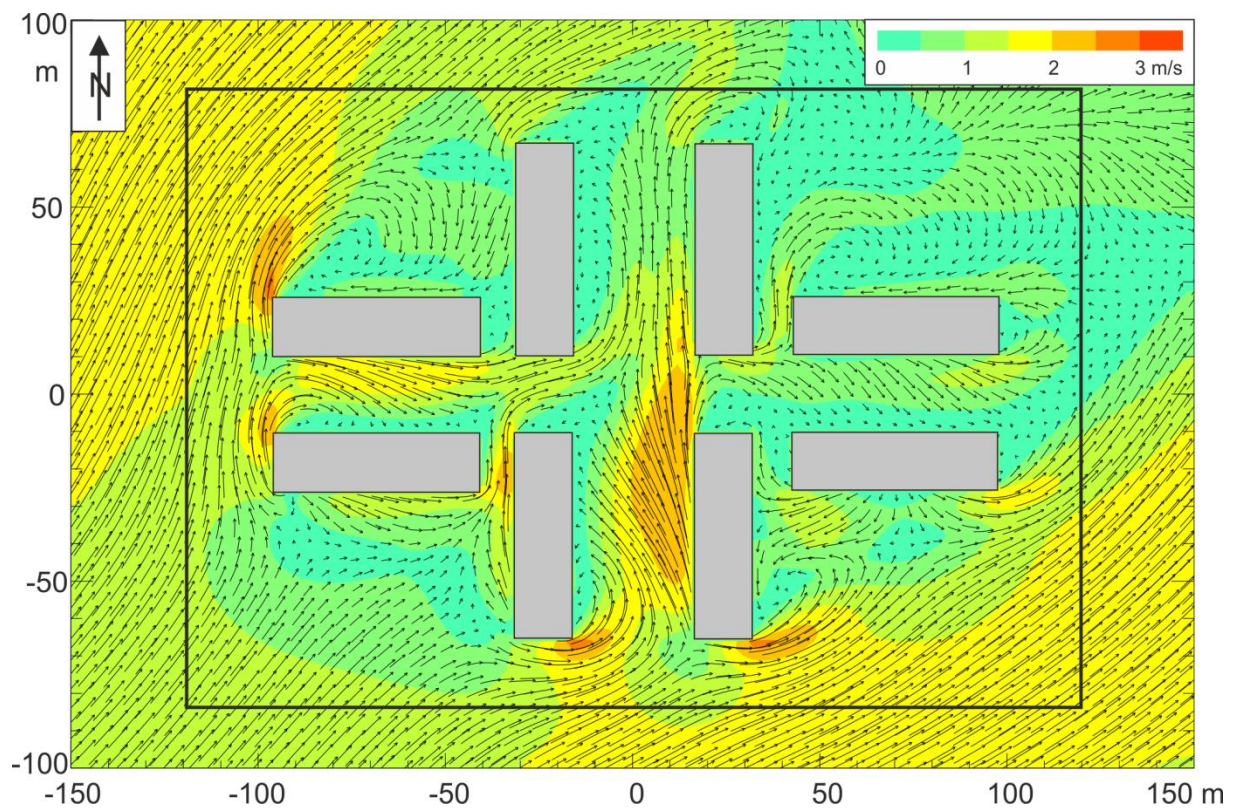
**Bild 4** Alle 15 Gebäudeanordnungen. Gezeigt ist jeweils nur der südwestliche Straßenblock (vgl. Bild 3). Die rote Linie markiert die Lage der Linienquelle.



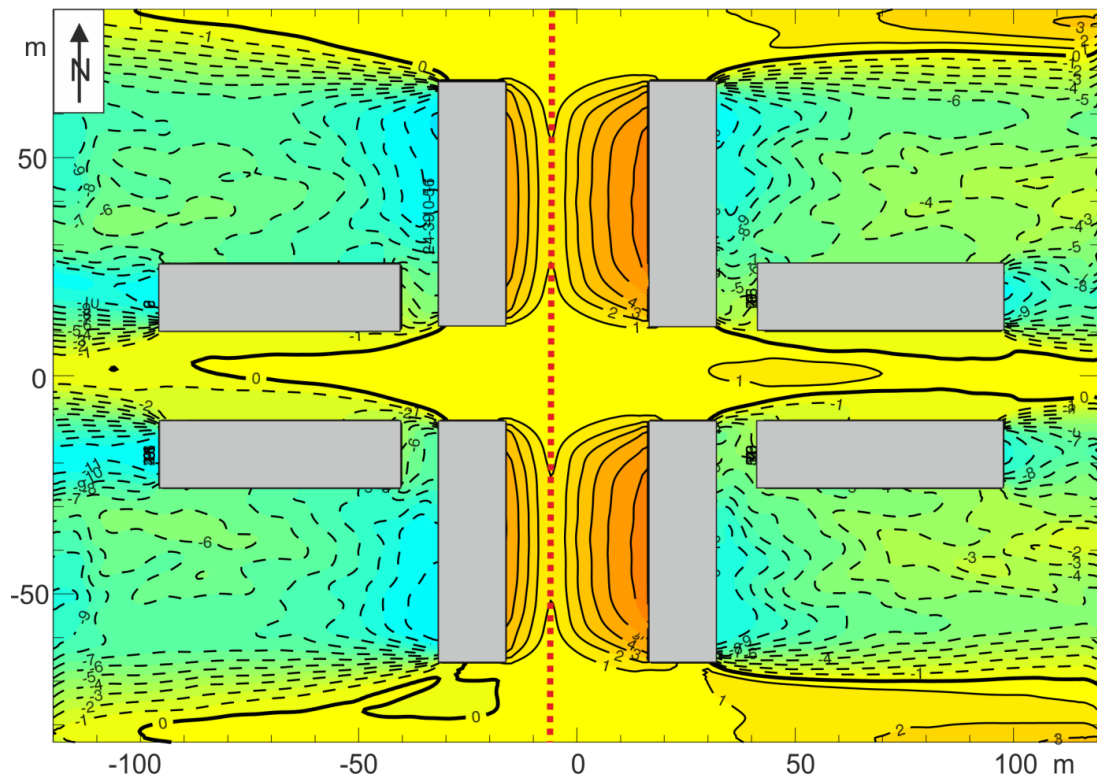
**Bild 5** Gebäudeanordnung Nr. 13. Umrandet ist der mittlere Block mit den Fassadenmesspunkten und eine 3D Ansicht davon aus Blickrichtung Südost (Pfeil). Die Linienquelle liegt bei  $x = 6$  m.



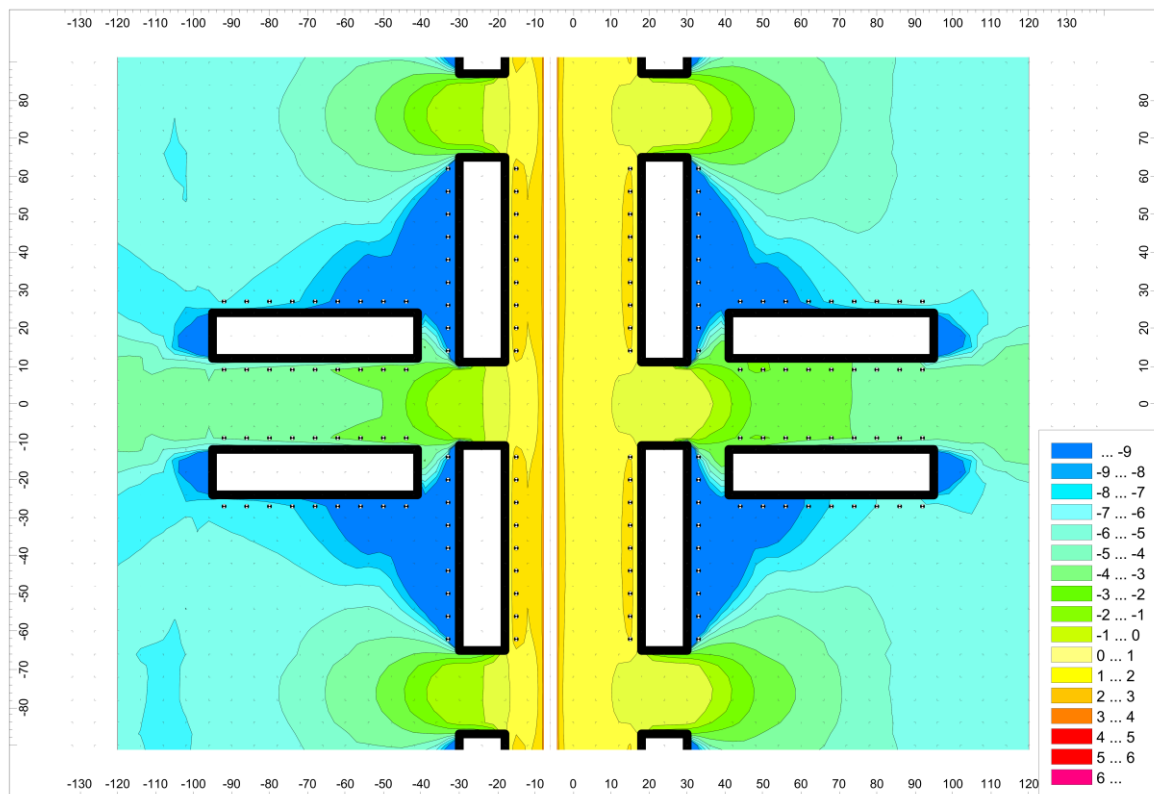
**Bild 6** Links: spektrale Verteilung der Schallemission bei verschiedenen numerischen Maschenweiten ( $\Delta x$ ). Rechts: berechnete Schallabschirmung hinter Gebäuden mit unterschiedlicher Höhe  $h$  in Abhängigkeit von der numerischen Maschenweite.



**Bild 7** Berechnete Strömung 5 m über Grund im Bereich der Bebauung der Gebäudeanordnung 13 bei Anströmung aus Südwest.

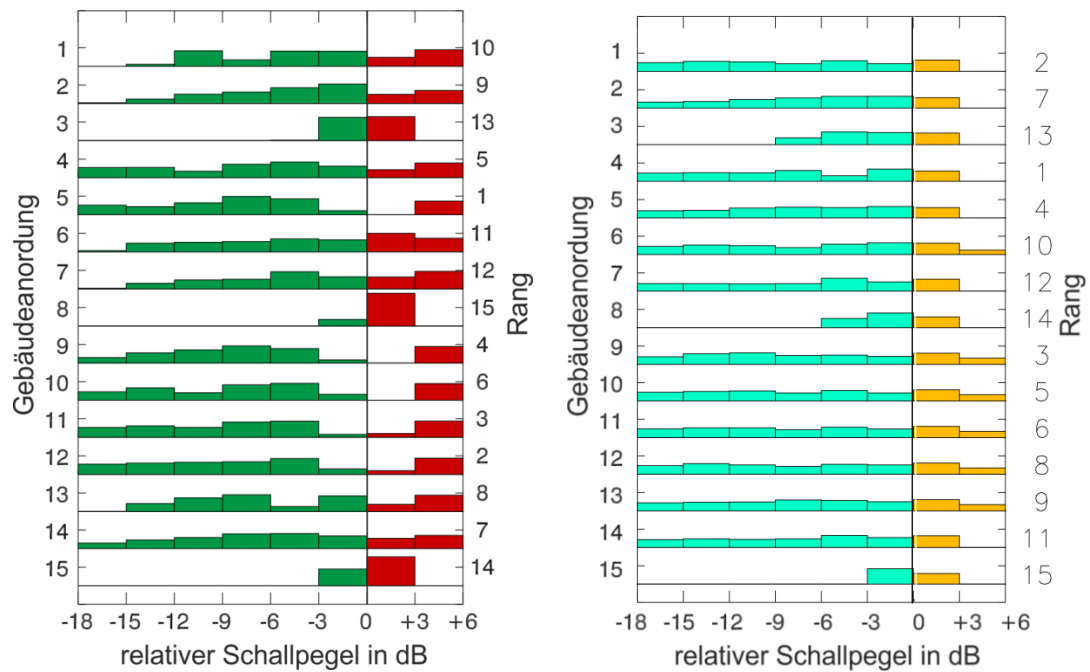


**Bild 8** Mittels FDTD-Modell berechneter Schallpegel (1,5 m ü. Grund) relativ zur unbebauten Situation für die Gebäudeanordnung 13 bei Windstille. Das Isoplethenintervall beträgt 1 dB. Die rote Linie markiert die Lage der Linienquelle.

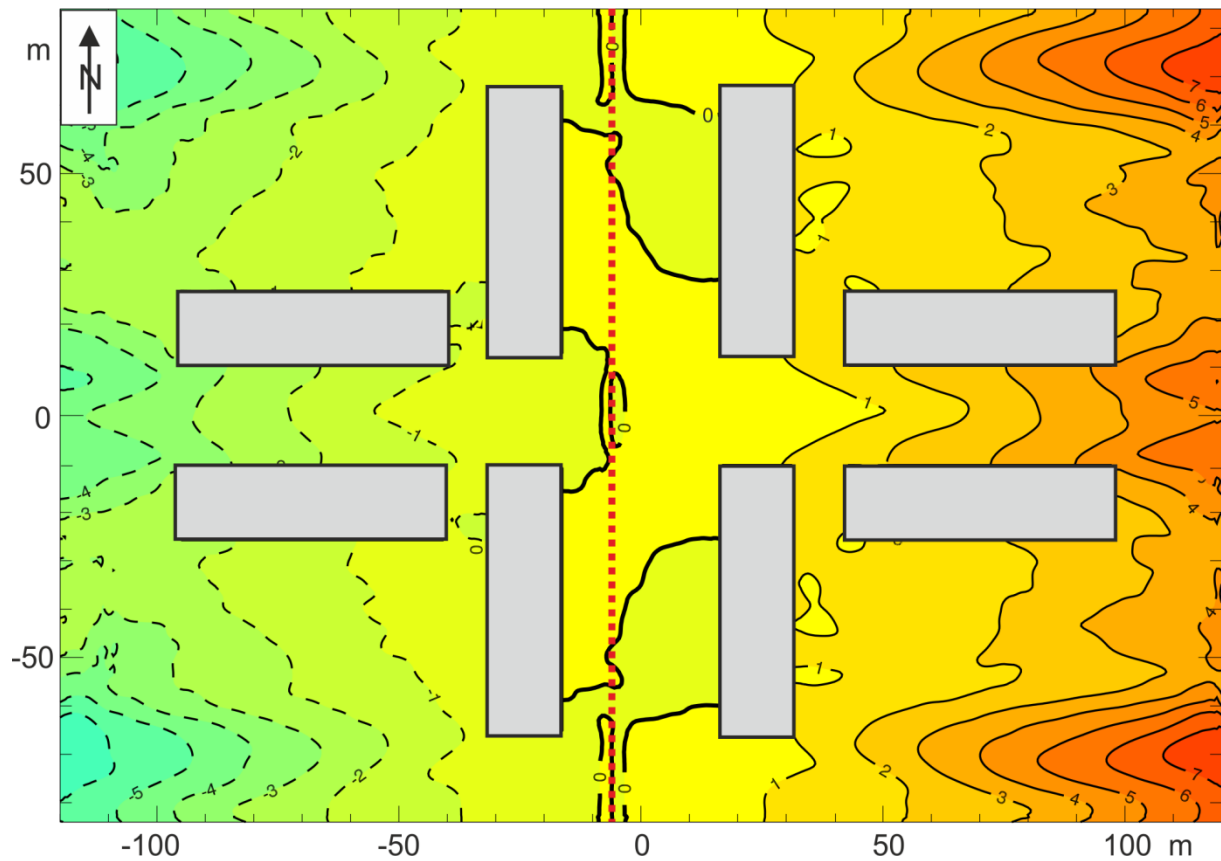


**Bild 9** Mittels ISO9613-2 berechneter Schallpegel (1,5 m ü. Grund) relativ zur unbebauten Situation für die Gebäudeanordnung 13 bei Windstille. Das Isoplethenintervall beträgt 1 dB. Die rote Linie markiert die Lage der Linienquelle.

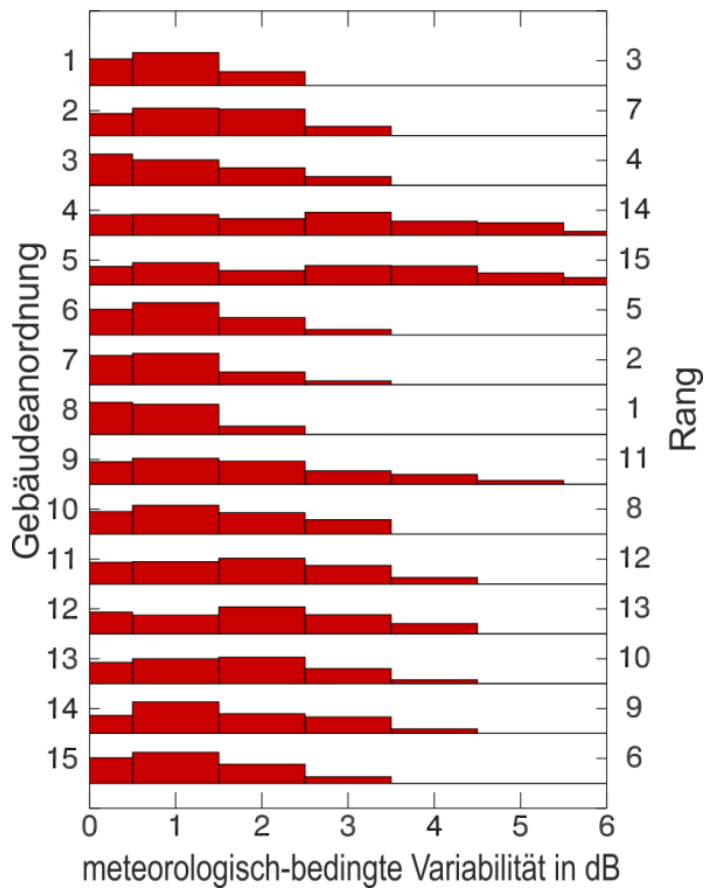




**Bild 10a (links) und 10b (rechts):** Häufigkeitsverteilung des Gebäudeeinflusses auf den Schallpegel vor den „Fenstern“ der Fassaden für alle Gebäudeanordnungen (Nummerierung siehe Bild 4). Zur besseren Erkennbarkeit ist die Balkenhöhe proportional zur Quadratwurzel der Häufigkeit aufgetragen. Grün: Minderung, rot/orange: Verstärkung. Rechts ist der Rang der Gebäudeanordnung angegeben: 1 = höchste Abschirmung, 15 = geringste Abschirmung.


















**Bild 11** Berechneter Schallpegel (1,5 m ü. Grund) bei Anströmung aus Westen relativ zum Schallpegel bei Anströmung aus Osten für die Gebäudeanordnung 13. Das Isoplethenintervall beträgt 1 dB. Die rote Linie markiert die Lage der Linienquelle.



**Bild 12** Häufigkeitsverteilung der meteorologisch bedingten Variabilität des Schallpegels vor den „Fenstern“ der Fassaden für alle Gebäudeanordnungen (Nummerierung siehe Bild 4). Zur besseren Erkennbarkeit ist die Balkenhöhe proportional zur Quadratwurzel der Häufigkeit. Rechts ist der Rang der Gebäudeanordnung angegeben: 1 = geringste Variabilität, 15 = höchste Variabilität.

**Tabelle 1:** Vergleich der Rangfolge aus unterschiedlichen Berechnungsmethoden bezüglich der Schallabschattung sortiert nach der Rangfolge gemäß der FDTD Methode. Die erste Spalte (Bild) enthält die Abbildung der Gebäudeanordnung, die zweite Spalte (GA) enthält die Nummer der Gebäudeanordnung, die dritte Spalte die Rangfolge berechnet mittels wellenbasiertem Modell (FDTD), die vierte Spalte die Rangfolge gemäß ISO 9613-2 und die fünfte Spalte die Differenz aus den beiden Berechnungsmethoden, die farblich hinterlegt eine Bewertung der Übereinstimmung der beiden Berechnungsmethoden darstellt, wobei grün Abweichungen im Bereich ( $x \leq |1|$ ), gelb mittlere ( $2 < |x| < 4$ ) und orange größere Abweichungen ( $|x| \geq 4$ ) markiert.

Bild	GA	FDTD	ISO 9613-2	diff2
	5	1	4	-3
	12	2	8	-6
	11	3	6	-3
	9	4	3	1
	4	5	1	4
	10	6	5	1
	14	7	11	-4
	13	8	9	-1
	2	9	7	2
	1	10	2	8
	6	11	10	1
	7	12	12	0
	3	13	13	0
	15	14	15	-1
	8	15	14	1